

С. В. Попов, канд. техн. наук

Полтавський державний аграрний університет

e-mail: stanislav.popov@pdau.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2381-152X

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ЦИЛІНДРА РІЗЦЕМ ІЗ ТВЕРДОГО СПЛАВУ

Анотація. Одним із показників ефективної роботи сучасного металорізального обладнання є точність оброблення. Важливим етапом у технології машинобудування є перехід від застарілих моделей металорізальних верстатів до обладнання із числовим програмним забезпеченням. Цього можливо досягти за умови збереження та суттєвого покращення точності оброблення, зокрема розточування отвору твердосплавним різцем у чавунній корпусній деталі.

Для оцінювання точності оброблення на металорізальному верстаті із числовим програмним керуванням проведено вимірювання розмірних параметрів циліндра. Здійснено статистичне оброблення результатів, яке дозволило зробити висновки щодо необхідності додаткового підналагодження обладнання, а також імовірної кількості браку.

Ключові слова: металорізальний верстат, зношування, різальний інструмент, статистичне оброблення, допуск, варіаційний ряд, гістограма, момент розподілу, підналагодження, брак продукції.

Постановка проблеми. Точність розмірів є одним із найважливіших показників ефективності роботи технологічного обладнання (металорізальні верстати) під час оброблення виробів машинобудування. Суттєвий вплив також має точність та якість виконання геометричних параметрів і безпосередньо конструкції різального інструмента [1; 2].

Одним із напрямів діяльності ПрАТ «Полтавський машинобудівний завод» є виготовлення обладнання для перероблення м'яса. Зокрема, вовчок-м'ясорубка марки К7-ФВП-160 (рис. 1, табл. 1) призначений безпосередньо для процесу подрібнення м'яса без кісток та м'ясних продуктів на етапі виробництва фаршу для різноманітних м'ясних виробів, що охолоджені до температури 4...12°C чи впливом низьких температур до 2...3°C [3].

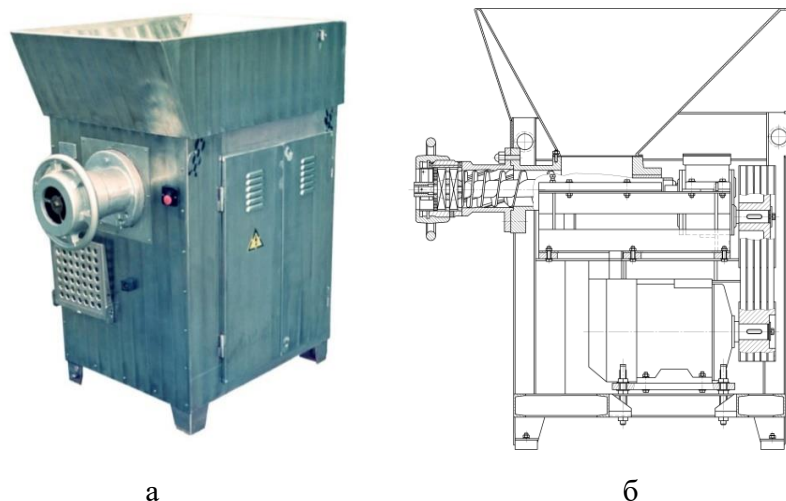


Рис. 1. Вовчок-м'ясорубка марки К7-ФВП-160 [3]: а – вид загальний; б – конструктивна схема

Таблиця 1

Технічна характеристика вовчка-м'ясорубки марки К7-ФВП-160 [3]

Назва параметра	Величина
Продуктивність, кг/год	5000
Діаметр решіток ножових, мм	160
Висота для завантаження сировини, мм	1600
Висота для вивантаження подрібненого продукту, мм	950
Місткість чаші завантаження, м ³	0,2
Потужність електричного двигуна, кВт	22

Під час розроблення нового технологічного процесу (перехід із застарілого обладнання на верстат із числовим програмним керуванням моделі 16К20Ф3) оброблення циліндра вовчка (рис. 2) виникла необхідність дослідити точність розточування деталі, виготовленої з чавуну марки СЧ20 (отвір $\varnothing 160H11$ мм) твердосплавним різцем ВК6 із використанням методів математичної статистики. Це має допомогти під час визначення точності обробки на обладнанні із ЧПК.

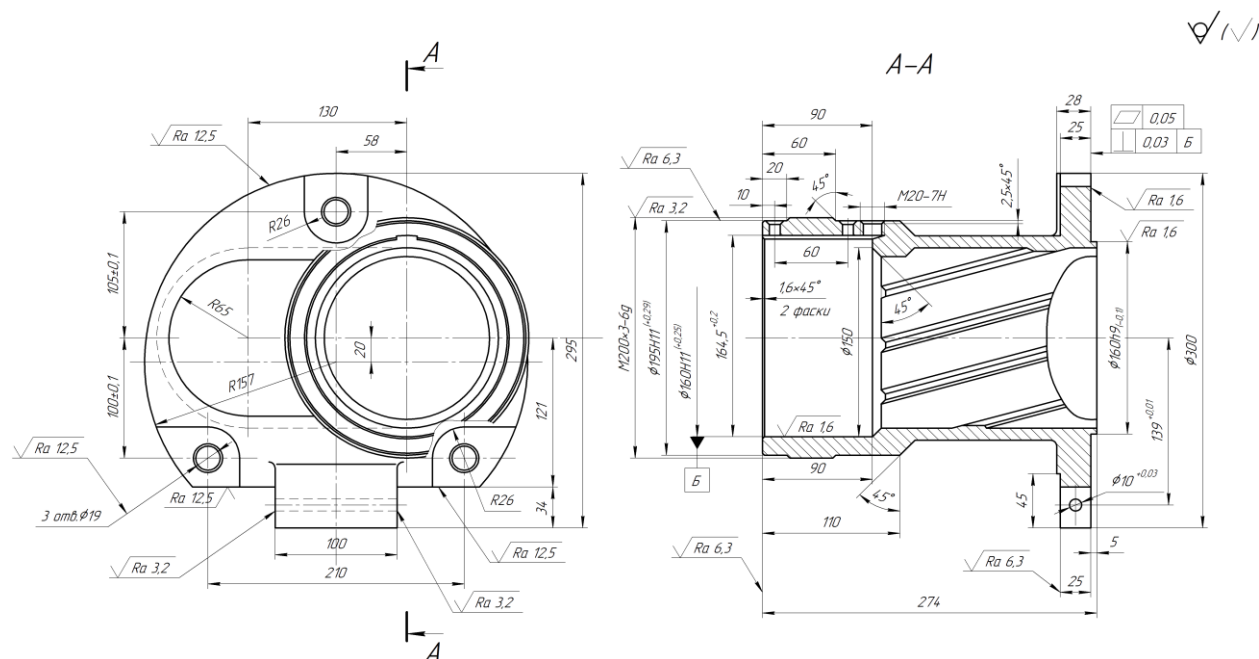


Рис. 2. Циліндр вовчка

Аналіз останніх досліджень. Значну кількість наукових робіт присвячено дослідженню процесів, що супроводжують токарне оброблення виробів із чавуну. Зокрема, науковці [4] зазначають, що оброблення металів різанням є однією з найважливіших операцій надання матеріалам необхідної форми. З огляду на це вони дослідили вплив сили різання на процеси деформації, зносу інструменту, напруження стиску з використанням методів оптимізації. Для прогнозування потужності різання використано аналітичний та експериментальний методи. Зазначено суттєвий вплив на зусилля під час різання таких факторів, як: швидкість; глибина; геометричні параметри різального інструменту. Зменшення зносу різального інструменту можливо завдяки скороченню вібрацій та величини сили різання.

Автоматизований контроль стану умов оброблення, заснований на вимірюваннях датчиками фізичних величин, що пов'язані зі зносом різального інструменту, пропонується в роботі [5]. Вони можуть бути використані як ознаки зношування різального інструменту. Однак ці

величини залежать не тільки від зносу, а також низки інших параметрів випадкового характеру. Запропоновано використовувати штучний інтелект для аналізу сигналів із різних датчиків для вивчення стану різальної кромки інструменту.

Під час оброблення важлива стійкість різального інструменту [6]. Її значення спрогнозувати доволі складно, тому що кожен інструмент та матеріал має різні характеристики. Для прогнозування ресурсу запропоновано використовувати рівняння Тейлора з константами, що враховують конкретні умови оброблення.

Стрімкий розвиток конструкційних матеріалів вимагає їх оброблення прогресивними різальними інструментами, що повинні мати високу термостійкість, зносостійкість і твердість [7]. Цим вимогам цілковито відповідають керамічні різальні інструменти, зокрема для оброблення чавуну. Проведено дослідження величини зносу керамічного різального інструменту під час оброблення на верстаті із числовим програмним керуванням. Зазначено, що підвищення швидкості різання впливає безпосередньо на зношування. Величина зносу різального інструменту має прямопропорційну залежність із поверхневою шорсткістю заготовки.

Авторським колективом [8] наведено результати дослідження стосовно оброблення чотирьох сортів чавуну інструментом із твердосплавним покриттям, а також без нього. Ефективність інструментів оцінювалася на основі даних експериментів зносу їх різальної частини, зміни сили різання, а також середньої температури.

Серед основних запитів сучасної промисловості слід зазначити якість обробки шляхом вибору матеріалів, а також методів оброблення [9]. Проведено дослідження токарного оброблення, початковими даними для якого були частота обертання шпинделя, подача та глибина різання. Досліджувалися такі параметри оброблення чавуну: час оброблення; швидкість знімання припуску; поверхнева шорсткість. Аналіз проведено з використанням емпіричного рівняння, що зіставлялося з даними експериментів.

Цікавим для ознайомлення є проведений порівняльний аналіз чистового фрезерування корпусної деталі [10]. Оброблення здійснювалася на звичайному верстаті, а також верстаті з числовим програмним керуванням. Виявлено рівень впливу елементарних похибок на точність оброблення. Визначальний вплив безпосередньо на точність оброблення на звичайному верстаті мають похибки налаштування та розмірного зношування фрези. На верстаті з числовим програмним керуванням маємо зменшену похибку налаштування. Також зменшено похибку інструменту шляхом програмованої корекції інструмента. Сумарна похибка на верстаті з числовим програмним керуванням є меншою у 2,6 раза, ніж на звичайному.

Отже, чималу кількість наукових досліджень, як закордонних, так і вітчизняних науковців, присвячено безпосередньо вивченню впливу режимних параметрів оброблення на зношування різального інструменту, визначення величини потужності різання, стан кромки, значення періоду стійкості, похибки оброблення. Водночас питанням розмірної точності виробів за результатами верстатної обробки приділено недостатньо уваги.

Формулювання мети статті (постановка завдання). За реальних умов у сучасному виробництві будь-який процес механічного оброблення відбувається під впливом чималої кількості факторів. Вони залежать від нестабільності припуску оброблення, непостійності режимів різання, твердості поверхневого шару матеріалу, складників сили різання, теплових деформацій тощо. Унаслідок цього розміри, що отримані після оброблення, носять випадковий характер. Практично неможливо виявити та провести оцінювання всіх закономірностей, що пов'язують похибки оброблення з факторами впливу. Таким чином, сучасні методи оцінювання похибок оброблення засновані на теоретико-ймовірнісному підході. Вони дозволяють розв'язати наступні задачі: встановлення виду матмоделі похибки; визначення характеристик матмоделі; визначення показників, що характеризують точність оброблення.



Для оцінювання точності оброблення необхідно виконати такі завдання: 1) провести вимірювання розмірного параметру циліндра, що контролюється, з побудовою точкових діаграм; 2) здійснити статистичне оброблення результатів; 3) провести детальний аналіз результатів статистичного оброблення.

Дослідження точності операції токарної обробки здійснюємо вимірюванням загальної вибірки, отриманої з одного металорізального верстату за час між його налагодженнями. Вплив зносу різального інструменту вважаємо мінімальним і не враховуємо його.

Основна частина. Проводимо дослідження точності оброблення діаметрального розміру циліндра вовчка, а саме Ø160Н11 мм. Оброблення здійснюємо на токарно-гвинторізному верстаті із ЧПК моделі 16К20Ф3. Метою аналізу розподілу точності оброблення деталей у партії є прогноз імовірної кількості придатних та бракованих деталей на операції.

Початковими даними є: дійсні відхилення оброблюваних деталей x_i ; кількість деталей у виборці становить 60 шт.; допуск на оброблення – 250 мкм; максимальне граничне відхилення $x_{max} = 250$ мкм; мінімальне граничне відхилення $x_{min} = 0$ мкм.

Варіаційний ряд отримуємо з початкових даних розташуванням у порядку зменшення (табл. 2).

Для побудови гістограми $\hat{f}_N(x)$, що є емпіричним аналогом функції щільності розподілу $f(x)$, виконуємо ряд певних дій.

Визначаємо попередню кількість квантів (інтервалів), на які необхідно розділити вісь Ox :

$$K = 1 + 3,2 \lg N, \quad (1)$$

де N – число даних варіаційного ряду.

$$K = 1 + 3,2 \lg 60 = 6,69.$$

Кінцевий результат заокруглюємо до найближчого цілого числа, тобто $K = 7$.

Таблиця 2

Варіаційний ряд

248	170	139	114	105	73
230	168	138	113	98	70
220	162	136	112	87	64
212	160	136	112	86	62
208	159	135	110	86	50
191	159	130	110	80	49
189	155	121	110	80	30
182	154	121	109	78	23
182	140	120	108	76	10
170	140	115	107	76	9

Довжина інтервалу:

$$\Delta x = (x_{max} - x_{min}) / K, \quad (2)$$

$$\Delta x = (250 - 0) / 7 = 35,7.$$

Центр розподілу або середина області зміни вибірки:

$$(x_{max} + x_{min}) / 2, \quad (3)$$

$$(250 + 0) / 2 = 125.$$

Визначаємо число спостережень N_m , що відповідають кожному інтервалу, причому N_m дорівнює числу членів варіаційного ряду, для яких виконується нерівність:

$$x_m \leq x_i < x_m + \Delta x, \quad (4)$$

де x_m , $x_m + \Delta x$ – межі інтервалу m .

Під час використання формули (4) значення x_i , що потрапило на межу між $(m - 1)$ та m інтервалами, відносять до інтервалу m .

Визначаємо відносну кількість спостережень N_m / N (відносна частота), що відповідають даному інтервалові.

Оброблення даних нашого експерименту представимо в табличній формі (табл. 3).

Таблиця 3

Оброблення експериментальних даних

№ інт.	Інтервал	m	$p = m / n$	Середина інтервалу
1	249,9...214,2	3	0,05	232,05
2	214,2...178,5	6	0,10	196,35
3	178,5...142,8	9	0,15	160,65
4	142,8...107,1	22	0,37	124,95
5	107,1...71,4	11	0,18	89,25
6	71,4...35,7	5	0,08	53,55
7	35,7...0	4	0,07	17,85
Σ		60	1,00	–

Побудуємо гістограму (рис. 3), що є ступінчастою кривою. Її значення на m інтервалі (x_m , $x_m + \Delta x$) постійно дорівнює N_m / N ($m = 1, 2, \dots, K$).

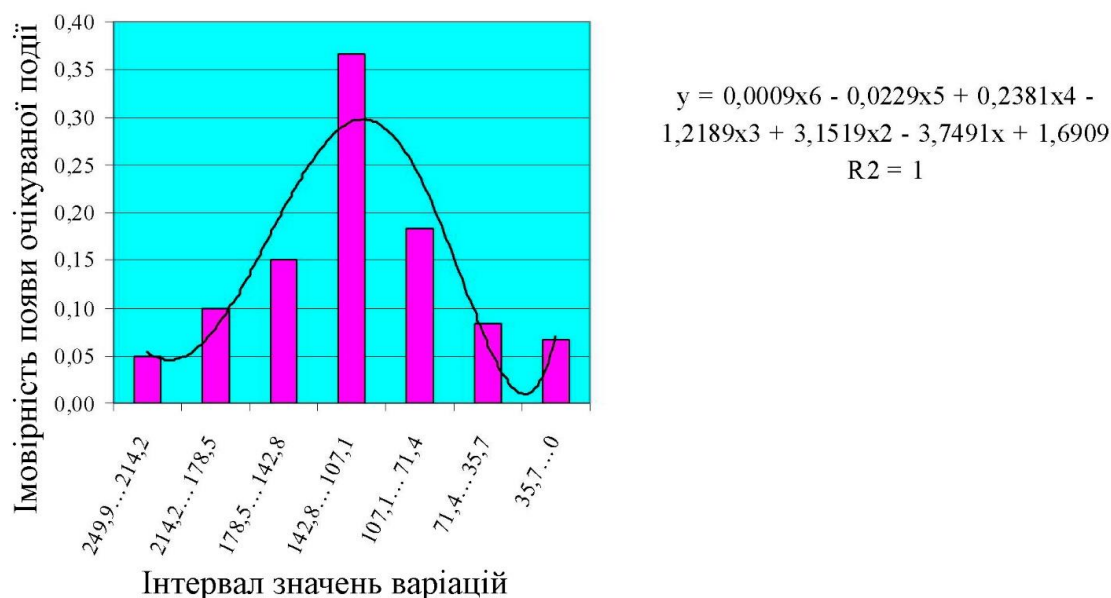


Рис. 3. Гістограма розподілу частоти появи випадкової величини

Використаємо метод моментів для порівняння емпіричного розподілу з теоретичним (приблизно приймаємо нормальним). Для цього необхідно визначити моменти розподілу та порівняти їх із моментами теоретичного нормального розподілу.

Функція диференціальна для закону нормального розподілу має вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

де e – основа натурального логарифму;

x_i – значення аргументу, що відповідає результатам вимірювань;

$\bar{x}$ – середнє арифметичне для ряду параметрів;

σ – середнє квадратичне відхилення.

Випадкові величини характеризують саме закони розподілу імовірностей. Під час математичних операцій, що стосуються випадкових величин, урахування розподілів потребує чималої обчислювальної роботи. У практичних розрахунках користуються числовими характеристиками розподілів. Серед них найбільш інформативними будуть моменти розподілу.

Центральний момент першого порядку буде нульовим. Розсіювання варіацій відносно середнього значення характеризує центральний момент 2-го порядку. Він називається дисперсією D_x або σ_x^2 (σ_x – середньоквадратичне відхилення). Центральний момент 3-го порядку характеризує асиметрію розподілу. Гостроверхність кривої щільності розподілу характеризує центральний момент 4-го порядку.

Екссес використовуємо для порівняння експериментального закону розподілу з нормальним:

$$E = \frac{\mu_4}{\sigma^4}. \quad (6)$$

Показник асиметрії:

$$q_s = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}}. \quad (7)$$

Для нормального розподілу:

$$\mu_1 = 0, \mu_2 = D_x, \mu_3 = 0, \mu_4 = 3\sigma_x^4, E = 0, q_s = 0. \quad (8)$$

Розрахунок розпочинаємо з визначення середнього арифметичного значення $\bar{X}$, а також оцінювання середнього квадратичного відхилення $\bar{\sigma}$. Потім перевіряємо гіпотезу про нормальність розподілу відхилень. Для цього визначаємо величину екссесу E , показник асиметрії q_s , а також їх розрахункові середньоквадратичні відхилення. Потім визначаємо коефіцієнт точності μ та правильність порівнянням фактичного E_ϕ та допустимого E_δ зміщення рівня налагодження, фактичного l_ϕ та допустимого l_δ коефіцієнта точності налагодження. Коефіцієнт точності μ визначимо як результат ділення граничної похибки визначеної величини $6\bar{\sigma}$ та допуску σ на оброблення. Якщо $\mu > 1$, то точність процесу є недостатньою. Деяка частина деталей піде у брак. Можливий випадок, що всі браковані деталі матимуть розміри менші допустимих. Тобто брак q_x за заниженими розмірами. Якщо всі браковані деталі матимуть розміри більші допустимих – брак q_x за завищеними розмірами. Імовірність відсотку браку q_1 і q_2 визначається за формулами з використанням функцій Лапласу. Величина E_ϕ є дійсним зміщенням центру налагодження обладнання відносно середини поля допуску. Знак вказуватиме на напрям зміщення. Якість налагодження обладнання вважається достатньою, якщо $l_\phi < l_\delta$. Якщо навпаки, то налагодження є незадовільним.

За $\mu = 1$ для роботи без браку необхідно, щоб виконувалася умова $l_\phi = l_\delta = 0$, що неможливо із практичної точки зору. Якщо $\mu < 1$, то точність процесу є цілком задовільною. Робота без браку можлива, якщо $E_\phi < E_\delta$.

Визначаємо моменти розподілу (табл. 4).

Для нашого випадку було отримано: середнє значення (математичне очікування) $m = 121,29$; дисперсія $\sigma^2 = 2868,65$; середнє квадратичне відхилення $\sigma = 53,56$; коефіцієнт екссесу $E = 1,01$; коефіцієнт асиметрії $q(s) = 0,001$; величина допуску $\delta = 250$ мкм; коефіцієнт точності $\mu = 17,60$.

Визначимо фактичну похибку налагодження верстату:

$$E_{\phi} = x_{cp} - \frac{x_{\epsilon} - x_{\eta}}{2}; \quad (9)$$

де x_{ϵ} , x_{η} – максимальне та мінімальне граничні відхилення.

Таблиця 4

Моменти розподілу

$x - x_{cp}$	$(x - x_{cp})^2$	$(x - x_{cp})^3$	$(x - x_{cp})^4$	Моменти			
				μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
110,76	12267,04	1358656,37	150480251,01	11,60	613,35	67932,82	7524012,55
75,06	5634,00	422888,31	31741996,56	19,64	563,40	42288,83	3174199,66
39,36	1549,21	60976,89	2400050,38	24,10	232,38	9146,53	360007,56
3,66	13,40	49,03	179,44	45,82	4,91	17,98	65,80
-32,04	1026,56	-32891,03	1053828,72	16,36	188,20	-6030,02	193201,93
-67,74	4588,71	-310839,05	21056237,44	4,46	382,39	-25903,25	1754686,45
-103,44	10699,83	-1106790,79	114486439,07	1,19	713,32	-73786,05	7632429,27
110,76	12,267,04	1358656,37	150480251,01	11,60	613,35	67932,82	7524012,55
Усього:				123,17	2697,96	13666,83	20638603,2

$$E_{\phi} = 121,29 - \frac{250 - 0}{2} = -3,71.$$

Визначимо допустиму похибку налагодження верстату:

$$E_{\phi} = \frac{T}{2} - \frac{\omega_{\epsilon}}{2}; \quad (10)$$

де T – допуск на розмір;

$$\omega_{\epsilon} = 6\sigma;$$

$$E_{\phi} = \frac{250}{2} - \frac{6 \cdot 53,56}{2} = -35,68.$$

Результати для порівняння заносимо до табл. 5.

Таблиця 5

Характеристики точності

Характеристики	За результатами вимірювань	Для нормального розподілу
Центральний момент 2-го порядку, μ_2	2697,96	2868,65
Центральний момент 3-го порядку, μ_3	13666,83	0
Центральний момент 4-го порядку, μ_4	20638603,22	24687519
Коефіцієнт ексцесу, E	2,84	0
Коефіцієнт асиметрії, $q(s)$	0,001	0

Оскільки $E > 0$, то крива щільності розподілу є більш гостроверхою, ніж крива нормального розподілу. Розподіл зрушений вправо.

Визначимо відсоток браку із застосуванням функцій Лапласу. Імовірний відсоток браку за верхньою та нижньою межами допуску:

$$P_{\phi, \phi} = (0,5 - \Phi(t_{\phi})) \cdot 100\% ; \quad (11)$$

$$P_{\phi, n} = (0,5 - \Phi(t_n)) \cdot 100\% ; \quad (12)$$

де

$$t_{\phi} = \frac{x_{\phi} - x_{cp}}{\sigma} , \quad (13)$$

$$t_n = \frac{x_n - x_{cp}}{\sigma} . \quad (14)$$

Тобто матимемо:

$$P_{\phi, \phi} = \left(0,5 - \Phi \left(\frac{250 - 121,29}{53,56} \right) \right) \cdot 100\% = 1,92\% ;$$

$$P_{\phi, n} = \left(0,5 - \Phi \left(\frac{0 - 121,29}{53,56} \right) \right) \cdot 100\% = -2,26\% .$$

Висновки. Проведено вимірювання розмірного параметру циліндра. Здійснено статистичне оброблення результатів вимірювань та детальний аналіз. Оскільки коефіцієнт точності $\mu = 17,60 > 1$, то точність процесу може бути підвищена. $E_{\phi} < E_{\phi}$, тобто $-35,68 < -3,71$, що свідчить про можливе підналагодження верстату (наприклад, коригуванням програми). Це безпосередньо вплине на зменшення кількості бракованих деталей. Враховуючи те, що кількість браку не перевищує 5%, то налагодження токарно-гвинторізного верстату із ЧПК моделі 16K20Ф3 під час розточування Ø160Н11 циліндра вовчка-м'ясорубки різцем із твердого сплаву ВК6 вважаємо прийнятним.

Список використаних джерел

1. Попов С.В., Васильєв А.В. Підвищення ефективності токарної оброблення гільз циліндрів розчинонасосів. *Scientific Journal ScienceRise*. 2019. № 8(61). С. 35–41. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2019.179035>
2. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування : монографія / Є.А. Фролов та ін. Полтава, 2019. 204 с.
3. Вовчок-м'ясорубка марки К7-ФВП-160. URL: <https://poltavamash.com/ua/component/jshopping/product/view/13/114?Itemid=198> (дата звернення: 16.02.2025).
4. Chandan K., Sanjay K., Ajay K. Reviews of Metal Cutting. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. 2020. 11(12). Р. 1730–1735. <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.12.2020.159>
5. Jemielniak K. Tool Condition Monitoring in Metal Cutting. *Soft Modeling in Industrial Manufacturing, Studies in Systems, Decision and Control*. 2018. 183. Р. 45–74. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03201-2_4
6. Sobron M., Lubis Y., Sofyan D., Steven D., Andri. Tool Life Investigation of Carbide Cutting Tools in the Turning of Cast Iron Material. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 725. 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/725/1/012039>
7. Lubis S., Darmawan S., Rosehan, Winata W., Zulkarnain M. Tool wear analysis of ceramic cutting tools in the turning of gray cast iron materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 857. 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/857/1/012003>
8. Martinez I., Tanaka R., Yamane Y., Sekiya K., Yamada K., Ishihara T., Furuya S. Wear characteristics of coated carbide tools in the turning of ductile cast iron. *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century: LEM21*. 2015. 2015.8. https://doi.org/10.1299/jsmelem.2015.8._0213-1
9. Bilal Ahamed S., Lavanyan R., Ranjith T., Basked N., Ganesan M., Vinoth Kumar S. Experimental Investigations and Comparative Analysis of Turning EN-8 & Cast Iron using L9 Orthogonal Array. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2019. 7 (02). Р. 1–7. <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV7IS02017>



10. Дерібо О.В., Дусанюк Ж.П., Кулик А.Ф. Порівняльний аналіз точності оброблення на верстаті із ручним керуванням і на верстаті з числовим програмним керуванням. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 5. С. 116–123.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2025 р.

S. Popov
Poltava State Agrarian University

RESEARCH ON THE ACCURACY OF CYLINDER MACHINING WITH A HARD ALLOY TOOL

Summary

The accuracy of machining on metal-cutting equipment is one of the main indicators of its efficiency. It is crucial for ensuring the quality of finished products. In the conditions of modern mechanical engineering, an important stage is the transition from outdated models of metal-cutting machines to new technologies. For example, machining on machines with numerical software. Thus, new opportunities open up for increasing the accuracy of machining. This will reduce production costs and improve the competitiveness of products.

One of the key tasks that must be solved within the framework of this transition is to ensure high machining accuracy, especially when boring holes with a carbide cutter in a cast-iron body part. The use of a carbide tool allows you to achieve better characteristics during turning. This will also have a positive effect on the accuracy of machining cast-iron products. Nevertheless, to achieve results, it is necessary to conduct a thorough analysis and control of the machining process.

To assess the machining accuracy on a CNC machine tool, the cylinder dimensional parameter was measured. This allowed us to collect data on the accuracy of the hole boring and determine deviations from the specified dimensions. The impact of cutting tool wear is considered minimal, so it was not taken into account. Statistical processing of the measurement results helped to draw conclusions about the need for additional equipment adjustment.

In addition, the results of the experiment allowed us to estimate the probable number of defects. They can occur during the machining process. Determining the causes of deviations and controlling machining accuracy are critically important for preventing the production of defective parts.

Constant monitoring and analysis of machining accuracy is the key to the effective operation of modern metal-cutting equipment and improving the quality of production in general.

Keywords: metal-cutting machine, wear, cutting tool, statistical processing, tolerance, variation series, histogram, distribution moment, fine-tuning, processing defect.